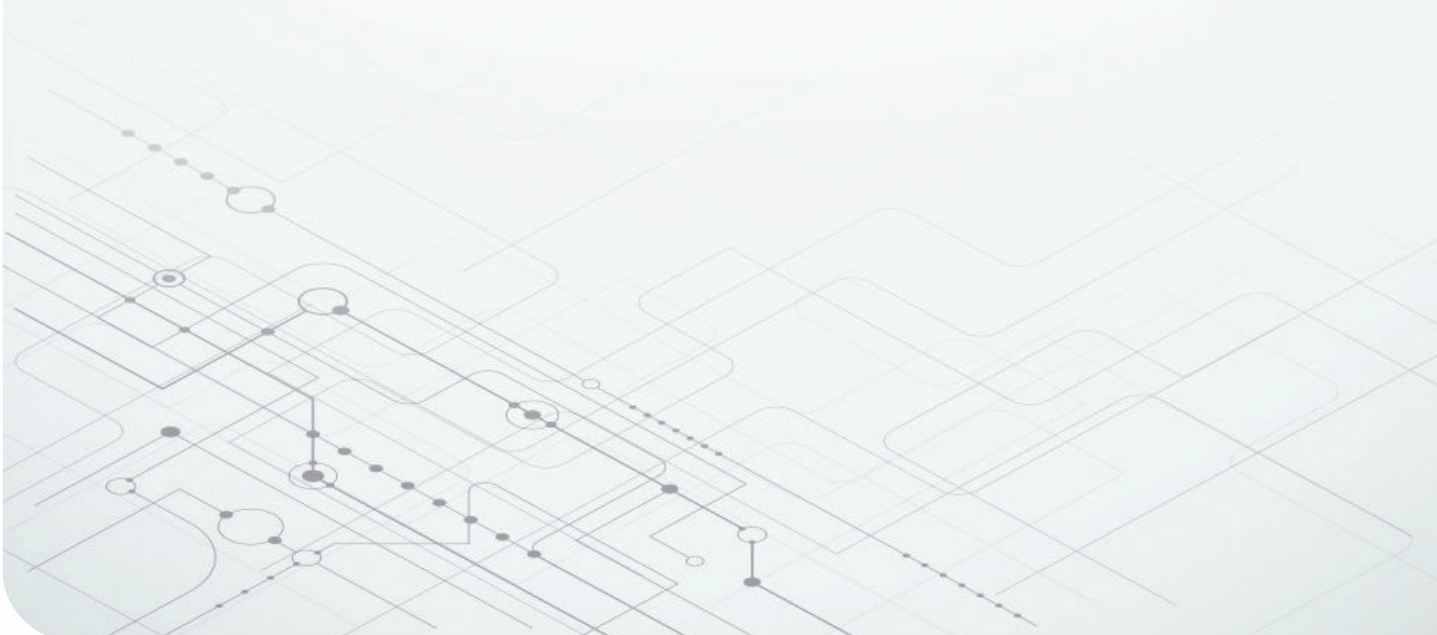


Sitara™ 处理器上的 EtherCAT®



Maneesh Soni
Systems Manager
Arm® Microprocessor Group



EtherCAT® 是基于以太网的先进通信标准之一，该标准越来越多地用于工业或工厂环境中的网络和通信。

EtherCAT 通信技术最初由德国的 Beckhoff Automation 公司研发，后经 EtherCAT 技术协会 (ETG) 标准化。

德州仪器 (TI) 公司是第一家授权 EtherCAT 技术的半导体公司，已将 EtherCAT 技术集成到所有 Sitara™ 处理器中。为了启用 EtherCAT，TI 根据其可编程实时单元 (PRU) 技术创建了用于工业通信的统一前端，并将 EtherCAT 和其他工业标准引入其不断增长的 Arm 微处理器平台。

引言

TI 还将软件、硬件和工具整合在一起，从而简化采用 Sitara 器件、基于 EtherCAT 的产品的开发流程。此外，由于支持工业级温度和较长的生命周期，Sitara 成为 EtherCAT 和其他工业网络应用的不二选择。

将 EtherCAT 集成到 Sitara 处理器可以更低成本实现出色的功能。例如，Sitara AM335x 处理器与 EtherCAT 集成可满足或超过所有必需的特性和性能基准，包括关键 EtherCAT 特性（例如分布式时钟和不到 700 纳秒 (ns) 的端到端延迟）。除了 Sitara 处理器的功能之外，TI 还为设计工程师提供各种相关软件、硬件和开发工具，从而简化 EtherCAT 产品的开发流程。

EtherCAT 简介

EtherCAT（用于控制自动化技术的以太网）是用于工业自动化应用（例如输入/输出 (I/O) 设备、传感器和可编程逻辑控制器 (PLC)）的实时工业以太网标准。它最初由 Beckhoff Automation GmbH 开发，但现在由 EtherCAT 技术协会监管，该组织旨在帮助完善 EtherCAT 标准。现如今，有来自 52 个国家/地区的 1,900 多家成员公司在创建和部署与 EtherCAT 兼容的产品。以太网已经在多种应用中得到广泛应用，但在工业环境中，它仍然不足以进行少量的数据交换，它对实时操作的确定性很低，并且仅适用于星形拓扑（在这种拓扑中，必须通过交换机连接网络节点）。EtherCAT 技术在以太网上添加了某些功能，并执行了某些配置，使其成为非常高效的自动化网络技术，同时完全符合以太网规范。EtherCAT 的设计使任何标准 PC 都可用作 EtherCAT 主站，并与 EtherCAT 从站进行通信，后者是符合 EtherCAT 规范的专用设备。EtherCAT 主从设备可一同用于工厂网络中的所有设备 - 自动化控制器、操作员界面、远程输入/输出单元、传感器、传动器、驱动器等。

技术

EtherCAT 通过实现“动态”处理对传统以太网进行了改进，在这种处理中，EtherCAT 网络中的节点会在帧通过时从该帧读取数据。所有 EtherCAT 帧都源自 EtherCAT 主站，后者会将命令和数据发送到从站。在帧通过时，从站将要发送回主站的任何数据写入该帧中。

这样便无需在主站和单个从站之间对小尺寸帧进行点对点交换，从而显著提高通信效率。但是，这也意味着每个从站必须具有两个以太网端口，并且在通过对通过的帧进行读取

或写入时，必须允许该帧通过，因此，从设备中需要有专用硬件。完成改进后，运行 EtherCAT 的 100Mbps 网络的可用带宽大于 90%，而主站必须与每个从站节点单独通信所用网络的可用带宽不足 5%。

EtherCAT 电报

如图 2 所示，EtherCAT 报文封装在以太网帧中，并包含一个或多个发往 EtherCAT 从站的 EtherCAT 数据报。这样的以太网帧在报头中使用 EtherCAT 类型，也可

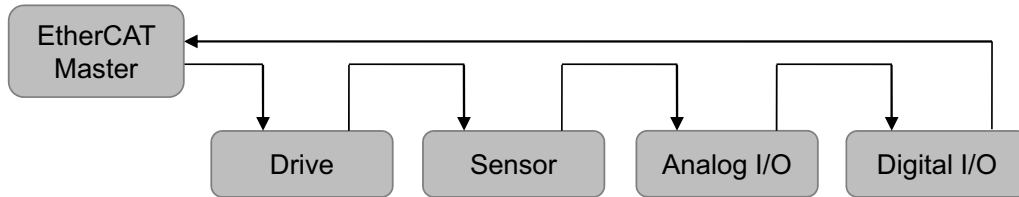


图 1. EtherCAT 网络示例。

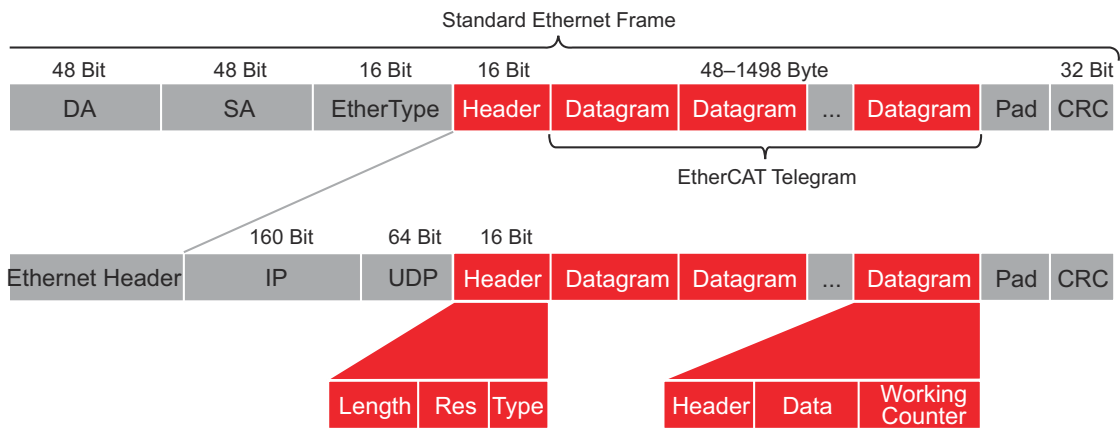


图 2. EtherCAT 电报。

具备很多 IP/UDP 报头。使用 IP 报头时，也能够通过网络路由器之间使用 EtherCAT 协议。

每个 EtherCAT 数据电报都是一个包含报头、数据和工作计数器的命令。报头和数据用于指定从站必须执行的操作，并且由从站更新工作计数器，从而使主站知晓从站已处理该命令。

协议

每个从设备都会“动态”地处理 EtherCAT 数据包，因为它会接收帧，对其进行解析，如果 EtherCAT 数据电报中指定的地址与它自己的地址匹配，则采取措施，并从其第二个端口转发整个数据电报，同时还更新数据包的内容和 CRC。通过数据电报，EtherCAT 主站可寻址多达 4GB 的整个地址空间，其中最多可放置 65,536 个 EtherCAT 从站，每个从站具有 65,536 个地址。EtherCAT 数据报对从站相对于网络中从站节点的实际位置的寻址顺序没有任何限制。

有不同的 EtherCAT 数据传输类型 - 循环和非循环。循环数据是按周期性间隔或周期时间传输的处理数据。非循环数据通常是对时间要求不严格的数据，其大小可能很大，并且通常会响应控制器命令进行交换。某些非循环数据（例如诊断数据）可能很关键，并且对时序有严格的要求。EtherCAT 通过优化的寻址方案（物理寻址、逻辑寻址、多重寻址和广播寻址）来满足这些不同的数据传输要求。

为了处理各种寻址方案，每个从站都有一个现场总线存储器管理单元 (FMMU)。

每个从站中的 FMMU 单元支持 EtherCAT 协议将各种从设备视为 4GB 大内存空间的一部分，而从站空间映射在其中。EtherCAT 主站在初始化阶段组装完整的处理映像，然后通过单个 EtherCAT 命令对从设备进行位级访问。这种功能可实现通过标准以太网控制器和标准以太网电缆，在整个现场总线网络的大型和小型设备上与任何数量的输入/输出 (I/O) 通道进行实际通信。

性能

由于基于硬件的 FMMU 和即时处理，EtherCAT 网络的效率非常高。它使微秒级循环时间能够从控制器传递到现场设备。通信效率不再是工业网络中的瓶颈，并实现了与现

代工业 PC 一样的计算速度。例如，提高的性能可使基于 EtherCAT 的分布式驱动器同时运行电流环路和位置环路。

拓扑

EtherCAT 标准支持任何拓扑（线形、星形或树形），并且也能够通过使用 EtherCAT 实现现场总线网络中常见的总线结构。由于 EtherCAT 接口存在于 I/O 器件上，因此不需要任何以太网交换硬件。凭借 100m 长的铜缆链路以及更长的光缆链路，EtherCAT 能够跨越大范围地理区域在数千种器件间进行通信。对于较短的距离，例如在背板上，EtherCAT 使用差分信号技术 E-bus。

分布式时钟

为了在彼此远离的已安装工业节点之间实现同步操作，必须同步其内部时钟。在遍历网络时，EtherCAT 通过对每个从节点上 EtherCAT 数据包的进出时间戳进行采样来实现同步。主设备使用从设备提供的时间戳信息来准确计算各个从设备的传播延迟。会根据该计算结果来调整每个从节点中的时钟，因此，这些时钟彼此同步到 $1 \mu s$ 以内。精确同步时钟的另一个优点是，能够将任何测量结果对应一个同步时间，并消除与器件间通信过程中出现的抖动相关的不确定性。

器件配置文件

在工业自动化中，使用器件配置文件是描述器件功能和参数的一种较为常用的方法。EtherCAT 提供与现有器件配置文件的接口，以便在轻松升级旧版现场总线器件后使用 EtherCAT。其中一些接口是 EtherCAT (CoE) 上的 CAN 应用层和 EtherCAT (SoE) 上的伺服驱动器配置文件，它们通过利用其数据结构到 EtherCAT 的映射来启用 CANOpen® 和 SERCOS®。

EtherCAT 节点的组成部分

每个 EtherCAT 节点 (图 3) 具有三个组件：物理层、数据链路层和应用层。

物理层使用 100BASETX 铜缆、100BASE-FX 光纤或基于 LVDS 信令的 E-bus 来实现。MAC 层根据 EtherCAT 标准规范在专用 ASIC 或 FPGA 中实现。工业应用

不在 MAC 层，该应用负责处理应用特定行为以及标准 TCP/IP 和 UDP/IP 协议栈，从而支持基于以太网的器件配置文件。根据器件的复杂性，EtherCAT 节点能够在硬件中实现，也可以是嵌入式 CPU 中运行的硬件和软件的组合。

合规性

为了确保使用 EtherCAT 接口设计的器件之间具有广泛的互操作性，EtherCAT Technology Group (ETG) 制定了多个程序来确保符合技术规范。这些程序包括一致性测试工具 (CTT)，它是用于测试一致性的软件程序；成员了解并测试各自器件的互操作性测试活动；以及在德国和日本进行正式认证测试的认证实验室。为了满足最低一致性要求，器件必须在首次投放市场前借助一致性测试工具通过协议测试。供应商可选择在任何授权的认证实验室中对他们的产品进行认证。ETG 网站提供了有关认证实验室的程序和位置的详细信息。

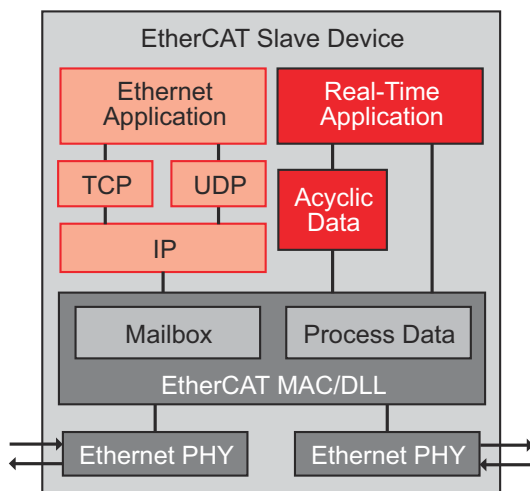


图3. EtherCAT 节点的组成部分。

典型的 EtherCAT® 节点

现如今使用的典型 EtherCAT 节点具有与下方某个图示类似的架构。许多简单的 EtherCAT 器件（例如数字 I/O）都可使用当今可用的单个 FPGA 或 ASIC 解决方案来创建。此类架构的简化版如图 4 所示。此类架构非常适合不需要软件且所有功能都在硬件中实现的成本敏感型简单 I/O 节点。

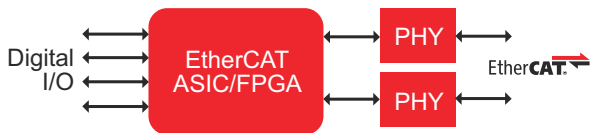


图 4. 基本数字 I/O EtherCAT 器件。

在需要额外处理能力的 EtherCAT 节点中，具有片上闪存的外部处理器通常与 EtherCAT ASIC/FPGA 相连，以进行应用级处理操作。此类器件可以与传感器应用相关，例如，其中需要处理器来操作传感器、实现设备驱动程序并运行 EtherCAT 协议栈。此类架构的成本高于简单数字 I/O 设备的成本，并允许开发人员灵活选择适合其需求和成本目标的处理器。



图 5. 采用 ASIC 和外部处理器的 EtherCAT。



图 6. 将 EtherCAT 与处理器集成。

而在另一种方法中，EtherCAT 实现是具有集成 CPU 的器件的其中一个外设。许多 FPGA 器件都可以在 FPGA 中配置处理器，或者已经拥有集成处理器。有些供应商提供的 ASIC 器件同时具备 EtherCAT 和适当的处理器。FPGA 很灵活，但根据选择的 CPU，会导致难以实现成本或工作频率目标的风险。

来自 TI 的 EtherCAT 解决方案

TI 已将 EtherCAT 功能集成到 Sitara 处理器中。这些器件将 Arm 内核与其他各种外设和接口集成在一起，从而成为用于构建工业自动化设备的不二选择。

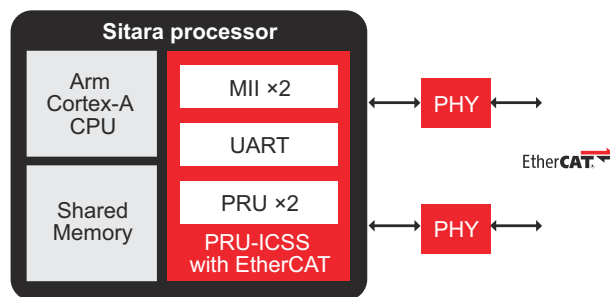


图 7. TI Sitara 处理器上的 EtherCAT 从站。

Sitara 处理器集成了可编程实时单元工业通信子系统 (PRU-ICSS)，该子系统支持与 MII 接口进行底层交互。此功能使 PRU-ICSS 能够实现专用的通信协议，例如 EtherCAT。

整个 EtherCAT MAC 层通过固件封装在 PRU-ICSS 中。PRU-ICSS 会动态处理 EtherCAT 电报，对其进行解析，对地址解码并执行 EtherCAT 命令。与运行 EtherCAT 协议栈（第 7 层）的 Arm 内核之间以及与工业应用之间需要进行的通信采用中断方式完成。PRU-ICSS 子系统还会以反方向执行帧转发。PRU-ICSS 能够实现所有 EtherCAT 功能，因此可将 Arm 内核用于复杂的应用，或者可将低速 Arm 内核部署用于更简单且成本有限的应用，例如分布式 I/O。

为了使用 Sitara 处理器完成 EtherCAT 解决方案，需要 TI 的 TLK105L、TLK106L、DP836X0、DP83822 或 DP8384x 等以太网 PHY 器件。

EtherCAT 软件架构

三种主要软件组件可在其中一款 TISitara 处理器上构成 EtherCAT 从站实施方案。第一个是在 PRU 中实现第 2 层功能的微代码。第二个是在 Arm 内核上运行的 EtherCAT 从站堆栈，第三个是工业应用，该应用依赖于使用此解决方案的终端设备。TI 在处理器软件开发套件 (SDK) 中提供了其他支持组件，例如协议适配层和设备驱动程序。不管是用 TI 测试的 EtherCAT 堆栈还是用别的堆栈，下页图 8 所示的架构都无需更改即可使用。这种 EtherCAT 解决方案还独立于操作系统之外，并且可参考 PRU-ICSS 固件 API 指南进行任何适应性调整。

在 EtherCAT 第 2 层中，PRU 实时内核分担数据电报处理、分布式时钟、地址映射、错误检测和处理以及主机接口的任务。

PRU 还模拟内部共享存储器中的 EtherCAT 寄存器空间。凭借确定性实时处理能力，PRU 能以始终如一且可预测的处理时延来处理 EtherCAT 数据电报。带有 TI DP83822 以太网 PHY 器件的 Sitara 处理器具有低延迟特性，这使 TI 的实施方案成为一款先进的 EtherCAT 从站解决方案。

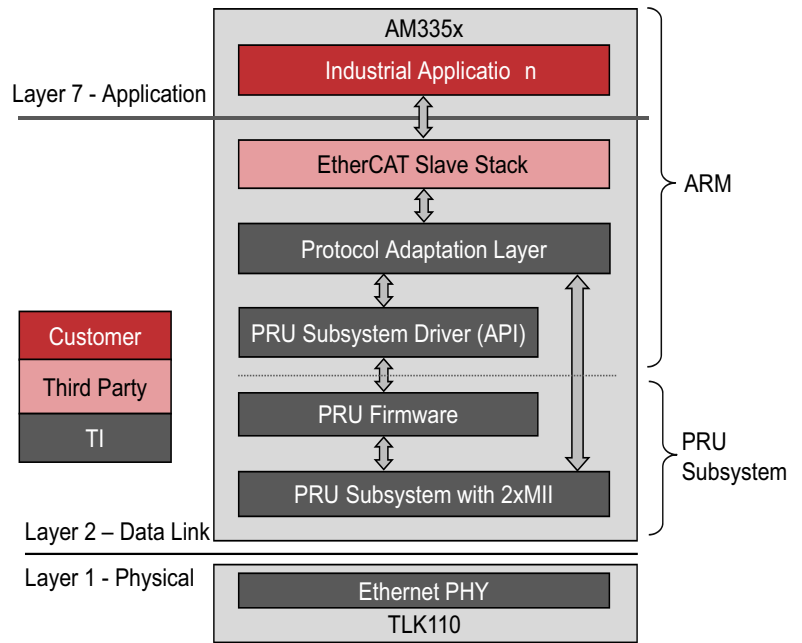


图 8. EtherCAT 从站的软件架构。

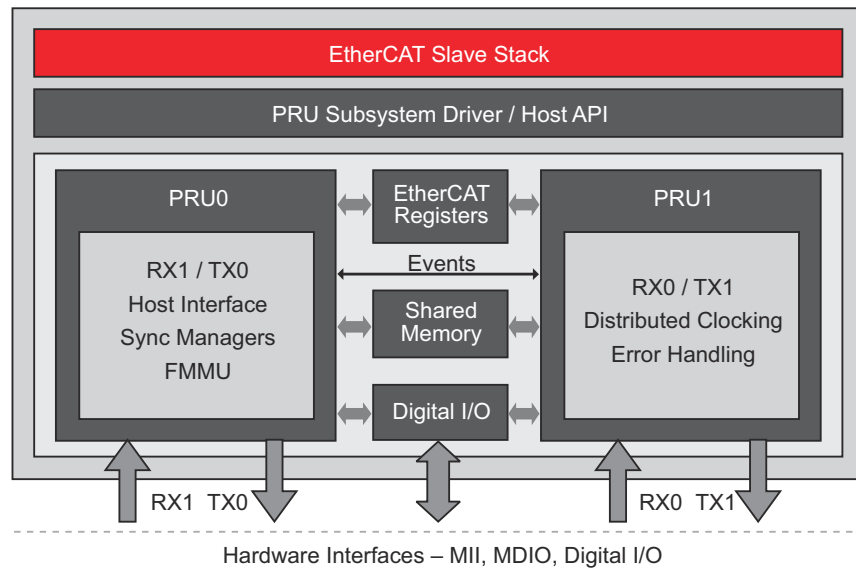


图9. EtherCAT 固件架构。

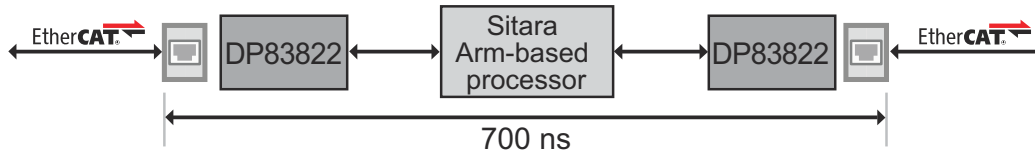


图10. EtherCAT RX-TX 延迟

主要 EtherCAT 参数

EtherCAT 固件数据表中提供了在 Sitara 处理器上实施 EtherCAT 从站的关键属性。

轻松进行 EtherCAT 集成

TI 已简化 EtherCAT 与 Sitara 处理器的集成过程。用于集成 EtherCAT 从站的所有必要工具和软件代码都能在处理器的软件开发套件 (SDK) 中找到。在每个开发平台上，SDK 均包括用于以下各项的固件：EtherCAT 协议、软件驱动程序、硬件初始化例程、协议栈 API 对应的适应层、EtherCAT 协议栈以及应用本身。此 SDK 附带的支持文档将指导用户如何修改应用的功能以及如何将新功能构建到应用中。

为了方便 EtherCAT 协议栈的集成，TI 与 Beckhoff Automation 紧密合作，在 Sitara 处理器上验证 EtherCAT 从站协议栈代码。Beckhoff 代码已经过修改，可在 Sitara 处理器上运行，并且已经过测试，确保对客户实现无缝集成。客户需要成为 ETG 成员（必须销售 EtherCAT 产品），并有权在将其产品推向市场之前直接通过 ETG 网站

免费获得 Beckhoff 协议栈副本。Beckhoff 的 EtherCAT 协议栈副本也包含在 Processor SDK 中，用于评估、开发和测试等。

对于典型用例，EtherCAT 固件、协议栈、驱动程序和高级操作系统（如果需要）或实时 OS 内核都可从各自的软件开发套件中重复使用。开发用户应用时，通常只有一个文件要由用户修改。

功耗

Sitara 器件上的 EtherCAT 实现受益于低功耗 Arm 内核和系统架构，无需使用风扇或散热器。例如，在大多数使用场景下，AM335x 处理器的峰值功率低于 1W。对于 EtherCAT 应用，Arm 高速 CPU 的功耗小于 1mW/MHz。

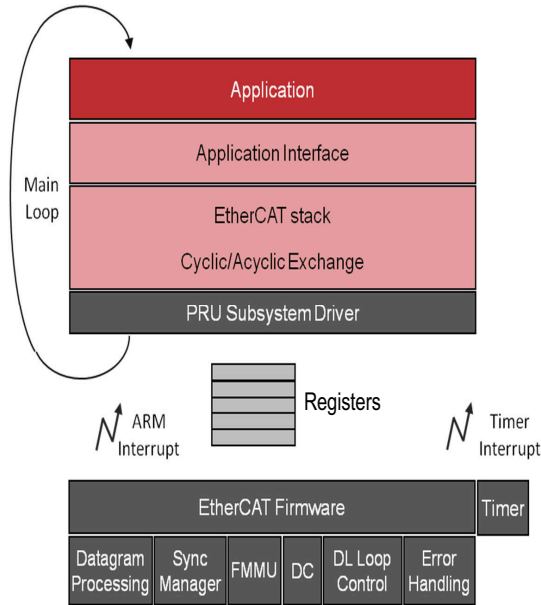


图 11. EtherCAT 软件集成。

在终端产品上集成 EtherCAT

为了将 EtherCAT 从站集成到工业设备中，客户可以使用 TI 的 EtherCAT 从站实现方式，并使用 Processor SDK 中提供的 EtherCAT 从站协议栈代码的评估副本来完成其设计过程。从站协议栈代码最初由 Beckhoff 开发，所有 ETG 成员均可免费使用。

客户也可使用不同供应商提供的或自行开发的从站协议栈。客户应借助一致性测试工具来通过所有测试。根据需要，客户随后可选择经 EtherCAT 认证实验室认证产品，也可在 EtherCAT 互操作性测试活动 (EtherCAT Plug Fest) 上执行更广泛的互操作性测试。

用于 EtherCAT 实现的开发工具

TI 为 Sitara 处理器提供了评估模块 (EVM) 开发平台和全面的设计数据，从而帮助客户进行实施。这些 EVM 的所有设计数据（例如原理图和布局）都可用于加速客户设计的开发。如需详细了解可用于特定处理器的工具，请[点击此处](#)。

此外，TI 还与面向工业应用的其他开发平台的外部供应商进行协作。

总结

TI 在 Sitara 处理器中提供面向工业 I/O、传感器、PLC 和人机界面 (HMI) 系统的集成式 EtherCAT 从站和主站功能。EtherCAT 与强大的低功耗 ARM 内核集成，可在不影响功能或性能要求的情况下打造出成本更低的终端产品。TI 还针对工业通信接口（如 EtherCAT、PROFIBUS、CAN、RS-485 等等）提供具有内置隔离功能的收发器。凭借全面的软件和硬件开发工具、全球范围的支持服务以及活跃的 E2E™ 开发者社区，客户有望显著简化 EtherCAT 集成并实现成本显著下降（多达 30%）等优势。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司